

Efectos del polvo de caliza en el desarrollo de plántulas de seis leguminosas

Effects of limestone dust on seedling development of six legume species

Jop Ruben Escobedo-Cruz¹ , Joel Flores² , Eduardo Estrada-Castillón³ , Renata Valdes-Alameda^{3*} 

¹Bio Nodo. SM Privada Residencial, Av. Aviana, Col. Sin Nombre 15, CP. 66057. Cdad. Gral. Escobedo, Nuevo León, México.

²Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A. C., División de Ciencias Ambientales. Camino a la Presa de San José 2055, Lomas 4ta Secc, CP. 78216. San Luis Potosí, San Luis Potosí, México.

³Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales. Carretera Nacional, kilómetro 145, Nacional 85, CP. 67700. Linares, Nuevo León, México.

*Autor de correspondencia: renatavalameda@gmail.com

Artículo científico

Recibido: 01 de junio 2025

Aceptado: 11 de noviembre 2025

RESUMEN. El aprovechamiento de roca caliza es fundamental para diversas industrias y para la economía nacional. Sin embargo, su extracción y transporte generan material particulado atmosférico que impacta de manera negativa los ecosistemas, desde la reducción de la producción primaria hasta la pérdida de biodiversidad. Este estudio evalúa el efecto del polvo de roca caliza en el crecimiento de plántulas de seis especies leguminosas nativas del noreste de México. Se encontró que la exposición a polvo de roca caliza afecta de manera variable la biomasa total y la asignación de biomasa entre la parte aérea y el sistema radical, así como la altura y el diámetro de copa en las plántulas de *Vachellia farnesiana*, *Ebenopsis ebano*, *Havardia pallens* y *Parkinsonia aculeata*. El material particulado no causó efectos en el crecimiento de las plántulas de *Erythrostemon mexicanus*, mientras que las de *Neltuma laevigata* fueron afectadas en todos los parámetros evaluados. Los resultados presentados sugieren que las plantas jóvenes de *E. mexicanus* son tolerantes al estrés provocado por la presencia de partículas de caliza y pueden ser empleadas en actividades de restauración o mitigación de la contaminación atmosférica. Además, se evidencian respuestas diferenciales entre las especies, lo que puede ser relevante como información base para la restauración ecológica, el monitoreo de la regeneración natural y el manejo de ecosistemas afectados por partículas sedimentarias.

Palabras clave: Crecimiento vegetal, contaminación atmosférica, Fabaceae, material particulado, matorral semiárido.

ABSTRACT. Limestone extraction is vital for various industries and plays a significant role in the national economy. However, its extraction and transportation generate atmospheric particulate matter that adversely affects ecosystems, causing impacts that range from reduced primary production to biodiversity loss. This study evaluates the effects of limestone dust on the growth of seedlings from six native leguminous species in northeastern Mexico. Exposure to limestone dust differentially affected total biomass, biomass allocation between aerial and root systems, height, and crown diameter in *Vachellia farnesiana*, *Ebenopsis ebano*, *Havardia pallens*, and *Parkinsonia aculeata*. In contrast, no effects were observed in *Erythrostemon mexicanus* seedlings, while *Neltuma laevigata* exhibited negative responses across all evaluated parameters. These findings suggest that *E. mexicanus* seedlings are tolerant to dust-induced stress, making them suitable for use in restoration or pollution mitigation efforts. Furthermore, the species-specific responses underscore the importance of this information for ecological restoration, monitoring natural regeneration, and managing ecosystems affected by sedimentary particles.

Keywords: Plant growth, air pollution, Fabaceae, particulate matter, semiarid thornscrub.

INTRODUCCIÓN

La industria de la roca caliza es importante para diversos sectores productivos, en especial el de la construcción. Sin embargo, durante el proceso de extracción y transporte de este recurso mineral, se libera polvo a la atmósfera que se mezcla con otras partículas, como suelo erosionado, emisiones industriales, polen y residuos orgánicos, dando lugar al material particulado atmosférico (Gieré y Querol 2010). El polvo atmosférico genera efectos adversos tanto en la salud humana como en los ecosistemas y aunque la mayoría de las investigaciones se han enfocado en los impactos sobre la salud humana, los impactos ecológicos deben evaluarse. Entre estos, el más evidente es la modificación al paisaje con la consecuente destrucción del hábitat y pérdida de biodiversidad (Ganapathi y Phukan 2020). No obstante, impactos no evidentes como la disminución de la producción primaria y la degradación de la capacidad de autorregulación del ecosistema también pueden conducir a la reducción de la biodiversidad (Grantz *et al.* 2003). Estas alteraciones afectan de manera directa los servicios ecosistémicos, lo que, a largo plazo, podría comprometer el bienestar social.

Las partículas liberadas en el proceso de aprovechamiento de la roca caliza se depositan en las plantas y el suelo de las regiones circundantes, por lo que pueden generar daños directos en las hojas e indirectos al cambiar características del suelo. Entre los impactos directos, se ha observado una reducción de la cobertura de copa, resultado de una muerte prematura de las hojas cubiertas de polvo (Kumar y Reddy 2016). Las partículas adheridas a la superficie de las hojas crean un efecto de sombreado, inhibiendo la absorción y transmisión de la energía lumínica (Paling *et al.* 2001). También, pueden bloquear los estomas, impidiendo la entrada de CO₂ a las hojas y restringiendo la salida de vapor de agua (Hirano *et al.* 1995). Así, la presencia de material particulado modifica la cantidad y calidad de la radiación que llega a las hojas, lo que altera la cantidad de clorofila (Nanos y Ilias 2007, Van-Heerden *et al.* 2007, Sabir *et al.* 2023). Sumado a lo anterior, la obstrucción de los estomas reduce la transpiración, lo que incrementa la temperatura foliar (Zia-Khaan *et al.* 2014). Estos procesos pueden cambiar la concentración de compuestos químicos y afectar la actividad enzimática, factores esenciales en la actividad fotosintética (Li *et al.* 2023, Sabir *et al.* 2023).

Además, las micropartículas de caliza se componen de carbonato de calcio por su origen sedimentario y tienen un pH alcalino que puede ocasionar daños directos en los tejidos foliares (Vardaka *et al.* 1995). La magnitud de estos efectos depende de la cantidad de polvo depositado, la cual varía en función de las condiciones ambientales y de las características de las hojas, como su estructura, superficie, orientación, exudados y elementos externos como la presencia de tricomas o ceras en la cutícula, así como del tamaño y forma de la copa (Sæbø *et al.* 2012).

Por otra parte, los daños indirectos se dan porque el material particulado depositado en las hojas llega al suelo mediante la lluvia y el escurrimiento en la vegetación. En el suelo, pueden transformar características físicas y químicas como el pH, la salinidad, el contenido de carbonatos y la densidad aparente (Kusza *et al.* 2016), afectando la capacidad de las plantas para absorber nutrientes. El cambio más notable en el suelo es el aumento de pH, que altera la disponibilidad de nutrientes, favoreciendo la disponibilidad de Ca y Mg y reduciendo el Al y Fe (Kusza *et al.* 2016). Este desbalance, de mantenerse, puede provocar cambios en la comunidad vegetal a largo plazo.

Los efectos del polvo, tanto directos como indirectos, generan un impacto fisiológico en las plantas que se traduce en reducción del crecimiento, desarrollo y capacidad reproductiva, reflejada en una menor producción de flores, polen, frutos y semillas (Padgett *et al.* 2007, IbrahimPour *et al.* 2021). A largo plazo, estas alteraciones pueden disminuir la regeneración natural, modificar la composición vegetal y reducir la capacidad de los ecosistemas para sostener a otras especies, incluyendo animales que dependen de estas plantas para su alimento o refugio (Grantz *et al.* 2003). Sin embargo, algunos estudios han identificado especies vegetales resistentes a la contaminación atmosférica por polvo de caliza (Fakhry y Migahid 2011, Siqueira-Silva *et al.* 2016, Zajec *et al.* 2016, Sabir *et al.* 2023), lo que resalta la importancia de explorar el impacto de este en distintas especies.

La composición de las partículas suspendidas varía en el tiempo y espacio, dependiendo de las características químicas de la roca de origen, de las actividades humanas y de las condiciones ambientales de la región estudiada (Grantz *et al.* 2003). Por lo anterior, las respuestas de las plantas a este tipo de contaminación deben interpretarse desde un contexto regional. El noreste de México se distingue por tener un importante desarrollo industrial, que incluye la extracción de caliza en minas a cielo abierto o canteras, conocidas en la zona como pedreras (Alvarado 2023). Esta actividad genera una gran cantidad de partículas que se liberan a la atmósfera y se depositan en los ecosistemas cercanos, con impacto en la vegetación nativa. El polvo de tales partículas calizas es de tamaño grueso en general y de composición carbonatada (Romo y Cruz 2009). Estas partículas se depositan de forma superficial sobre las hojas, afectando procesos como el intercambio gaseoso y la transpiración. Las plantas de los ecosistemas semiáridos de la región enfrentan estrés hídrico propio del clima (Estrada *et al.* 2015, González-Rodríguez *et al.* 2016), el cual puede agravarse debido a la deposición de los residuos mineros. Esta interacción entre el estrés climático y el antropogénico puede comprometer la regeneración natural (Yaghmaei *et al.* 2022).

En el presente trabajo, el término contaminación por polvos se utiliza para referirse a la deposición de partículas calizas sobre la superficie foliar. Este fenómeno puede involucrar diversos procesos físicos y biológicos, ya que la interacción entre las partículas suspendidas y los tejidos vegetales depende de múltiples variables, como el tamaño, forma y composición química de las partículas, así como de los parámetros meteorológicos (temperatura atmosférica, humedad relativa, precipitación pluvial, velocidad y dirección del viento, entre otros) y de las características foliares (rugosidad de la superficie, disposición de las células epidérmicas, presencia de tricomas y ceras, tamaño y densidad estomática) (Ram *et al.* 2015). Estos factores determinan la eficiencia de deposición, la persistencia del polvo y el grado de interferencia con los procesos fisiológicos de las plantas (Sæbø *et al.* 2012). En este contexto, las partículas calizas empleadas en el experimento representan un tipo de estrés físico-químico particular, cuyo efecto podría manifestarse a través de alteraciones en el crecimiento vegetal.

Evaluar el grado y la severidad de la degradación generada por la contaminación con micropartículas permite optimizar los métodos de manejo y aprovechamiento sostenible de los recursos naturales (Yaghmaei *et al.* 2022). Además, analizar las respuestas de las plantas a este factor de estrés proporciona información para la selección de especies resistentes, facilitando su incorporación en programas de restauración ecológica, estrategias de revegetación en áreas impactadas y su uso en entornos urbanos. Este trabajo evalúa el crecimiento de plántulas de seis especies de ecosistemas semiáridos del noreste de México expuestas a polvo de roca caliza en

condiciones controladas. Se analiza la biomasa producida y el crecimiento de copa y altura de las especies: *Neltuma laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) Britton & Rose, *Vachellia farnesiana* (L.) Wight & Arn., *Ebenopsis ebano* (Berland.) Barneby & J.W.Grimes, *Erythrostemon mexicanus* (Rose) Gagnon & G.P. Lewis, *Havardia pallens* (Benth.) Britton & Rose y *Parkinsonia aculeata* L., tanto en ausencia como en exposición al polvo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación y condiciones ambientales

La investigación fue realizada en la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León (24° 47' 43.00" LN, 99° 32' 29.51" LO) con una elevación de 379 msnm. Según García (1964), en su modificación para la clasificación climática de Köppen, la región se caracteriza por tener un clima semicálido - subhúmedo con lluvias en verano, su temperatura media anual es de 22 °C y su precipitación de 749 mm. El experimento se llevó a cabo en los meses de febrero a abril, dentro del invernadero de la institución. La temperatura del invernadero fluctuó entre 10 °C min. y 38 °C max., con una humedad relativa de ~70%.

Material vegetal:

Se utilizaron seis especies: *Neltuma laevigata* (antes *Prosopis laevigata*), *Vachellia farnesiana* (antes *Acacia farnesiana*), *Ebenopsis ebano*, *Erythrostemon mexicanus* (antes *Caesalpinia mexicana*), *Havardia pallens* y *Parkinsonia aculeata* L. La selección se basó en su abundancia y dominancia en la vegetación de las áreas cercanas a las distintas minas de roca caliza regionales, así como por su papel ecológico en el proceso de regeneración y utilidad para la población local en la producción de madera, forraje y alimento (Estrada-Castillón *et al.* 2023, Valdes-Alameda *et al.* 2024).

Para obtener las plántulas, se colectaron y germinaron semillas de poblaciones del Matorral Escuela de la Facultad de Ciencias Forestales (UANL). Se seleccionaron semillas de individuos vigorosos, sanas y sin daño aparente por insectos. Para uniformar la germinación, se realizó una escarificación mecánica según Flores y Jurado (1998). Las semillas se colocaron en cajas Petri con papel absorbente húmedo dentro de una cámara de germinación con un fotoperiodo de 12 h luz/ 12 h oscuridad y una temperatura constante de 25 °C. Una vez germinadas, se seleccionaron plántulas que emergieron en tiempos similares y se trasplantaron a bolsas de polietileno (10 x 20 cm) con suelo mineral local como sustrato. Previo al inicio de los tratamientos, las plántulas se aclimataron durante 10 días en invernadero con riego regular.

Material particulado

El polvo utilizado en el experimento se obtuvo de los extractores y filtros instalados en las trituradoras de roca caliza, los cuales capturan las partículas suspendidas durante el proceso de trituración. La formación geológica presente en el área de extracción corresponde a El Abra; de acuerdo con los datos del Servicio Geológico Mexicano (SGM), este material está compuesto de manera principal por calcita (CaCO₃) en una proporción de entre 93 y 97%, con pequeñas zonas que contienen dolomita (MgCO₃) (Romo y Cruz 2009). El SGM, a partir de los análisis realizados, también señala la presencia de nódulos o bandas con sílice, así como trazas frecuentes de óxidos

de hierro y aluminio (Al_2O_3). Por tanto, el polvo generado durante la extracción o trituración de esta roca está formado en su mayoría por carbonato de calcio, con pequeñas cantidades de cuarzo (pedernal) y dolomita, además de trazas de óxidos y arcillas.

Diseño experimental y análisis

El experimento incluyó dos grupos, uno expuesto al polvo de caliza y un grupo control sin exposición. Cada grupo tuvo 10 plántulas de cada especie (60 por tratamiento). El polvo se aplicó sobre las hojas y tallos con un dispositivo para talco que permitió distribuir de manera uniforme 3.5 g por plántula cada tres días durante un periodo de 90 días. Esta dosis se calibró mediante pruebas preliminares en las que se pesó el material liberado en cada activación del dispositivo aplicador.

Durante el experimento, las plántulas fueron regadas cada cuatro días con 500 mL de agua, evitando el lavado de las partículas aplicadas para permitir su acumulación. Para evitar la contaminación cruzada de polvo, los tratamientos se separaron 15 m y se instaló una barrera plástica entre ellos. Al finalizar el experimento, las plantas se cosecharon y lavaron con agua para eliminar residuos, evitando daños en las raíces. Después se obtuvieron datos de biomasa, separando la biomasa aérea (tallo y hojas) y la biomasa de raíz, esta última subdividida en raíz primaria y secundaria. El material vegetal se secó en bolsas de papel en una estufa a 70 °C durante tres días para determinar el peso seco.

Para determinar diferencias en la biomasa, altura y diámetro desarrollados, se realizaron pruebas de t-Student y U de Mann-Whitney, según la distribución de cada grupo de datos, que fue revisada con pruebas de Kolmogorov-Smirnoff. Todos los análisis se realizaron en el programa R versión 4.3.3.

RESULTADOS

Se encontraron respuestas variables en el desarrollo de biomasa, diámetro de copa y altura en las especies estudiadas cuando estuvieron expuestas al polvo de roca caliza. Los promedios de biomasa en peso seco se presentan en la Tabla 1 y los promedios que corresponden al crecimiento en copa y altura en las Figuras 1 y 2, respectivamente.

En las plántulas de *Erythrostemon mexicanus* no se observaron diferencias entre los tratamientos para ninguna de las variables estimadas de biomasa y crecimiento (parte aérea: $t = -0.45$, g.l.= 18, $P = 0.65$, raíz: $U = 47.00$, $P = 0.82$, copa: $t = 2.07$, g.l.=13.08, $P = 0.05$, altura: $t = 1.42$, g.l. = 18, $P = 0.17$).

Para *Vachellia farnesiana*, la biomasa desarrollada en la parte aérea y en la raíz fue similar entre los tratamientos ($t = 0.14$, g.l.= 18, $P = 0.88$ y $U < 30.00$, $P = 0.13$); sin embargo, las plántulas expuestas al polvo tuvieron mayor tamaño de copa ($t = -6.04$, g.l. = 18, $P < 0.01$), contrario a lo ocurrido en la altura, donde las plántulas del grupo control fueron más altas ($t = 6.49$, g.l. = 18, $P < 0.01$).

Los resultados de *Parkinsonia aculeata* mostraron que el grupo control tuvo mayor peso seco en la parte aérea y en la raíz, en particular en la raíz principal (parte aérea: $t = 4.80$, g.l.= 18, raíz: $P < 0.01$;

U = 12.00, P < 0.01). El mismo grupo también tuvo un mayor tamaño de copa (t = 36.71, g.l.= 12.55, P < 0.01), pero la altura fue similar entre los tratamientos (t = -0.18, g.l. = 18, P = 0.85).

Tabla 1. Medias de biomasa en peso seco (gramos) obtenidos al final del experimento separado por secciones evaluadas.

Especie	Grupo	Biomasa total	Parte aérea (tallos y hojas)	Raíz completa	Raíz principal	Raíz secundaria
<i>E. mexicanus</i>	C	3.38 ± 1.22 ^a	1.73 ± 0.63 ^a	1.65 ± 0.89 ^a	1.21 ± 0.69 ^a	0.43 ± 0.23 ^a
	T	3.45 ± 1.84 ^a	1.92 ± 1.16 ^a	1.53 ± 0.88 ^a	1.18 ± 0.68 ^a	0.34 ± 0.21 ^a
<i>V. farnesiana</i>	C	5.22 ± 1.61 ^a	2.26 ± 0.71 ^a	2.96 ± 0.96 ^a	2.49 ± 0.69 ^a	0.47 ± 0.30 ^a
	T	4.19 ± 3.53 ^a	2.16 ± 2.05 ^a	2.02 ± 1.72 ^a	1.5 ± 1.44 ^a	0.52 ± 0.47 ^a
<i>P. aculeata</i>	C	6.37 ± 1.45 ^a	3.76 ± 0.80 ^a	2.61 ± 0.97 ^a	2.15 ± 0.77 ^a	0.45 ± 0.33 ^a
	T	2.87 ± 1.59 ^b	1.75 ± 1.04 ^b	1.11 ± 0.82 ^b	0.78 ± 0.52 ^b	0.32 ± 0.40 ^a
<i>H. pallens</i>	C	3.19 ± 1.44 ^a	1.59 ± 0.84 ^a	1.59 ± 0.87 ^a	1.3 ± 0.77 ^a	0.28 ± 0.19 ^a
	T	1.53 ± 1.09 ^b	0.87 ± 1.04 ^a	0.65 ± 0.45 ^b	0.46 ± 0.28 ^b	0.19 ± 0.20 ^a
<i>E. ebano</i>	C	3.58 ± 1.06 ^a	3.12 ± 0.97 ^a	0.45 ± 0.33 ^a	0.34 ± 0.23 ^a	0.11 ± 0.11 ^a
	T	1.55 ± 0.72 ^b	1.46 ± 0.75 ^b	0.09 ± 0.12 ^b	0.07 ± 0.11 ^b	0.02 ± 0.01 ^a
<i>N. laevigata</i>	C	5.50 ± 0.82 ^a	4.31 ± 0.72 ^a	1.18 ± 0.74 ^a	0.45 ± 0.22 ^a	0.73 ± 0.81 ^a
	T	1.58 ± 0.65 ^b	1.25 ± 0.67 ^b	0.32 ± 0.12 ^b	0.17 ± 0.06 ^b	0.14 ± 0.10 ^b

Grupo: T = tratamiento (con polvo), C = control (sin polvo). Letras distintas entre tratamientos dentro de una misma especie indican diferencias significativas. Letras iguales indican que no hay diferencia significativa entre tratamientos (P ≤ 0.05).

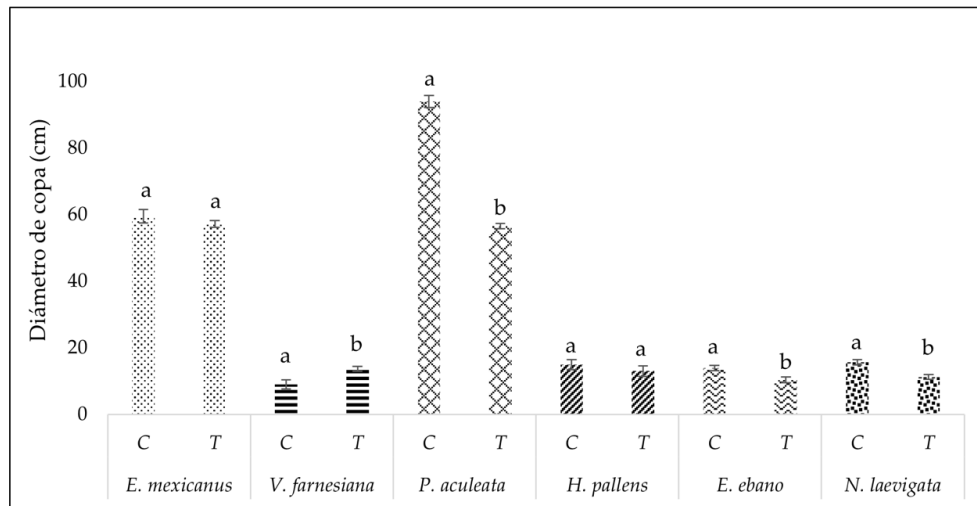


Figura 1. Promedios de diámetro de copa por especie y tratamiento. T = tratamiento (con polvo), C = control (sin polvo). Las barras de error representan la desviación estándar. Letras iguales indican que no hay diferencia significativa entre tratamientos (P ≤ 0.05).

Para *Havardia pallens* se encontró un mayor desarrollo de biomasa en la raíz principal y mayor altura en las plántulas sin polvo (raíz: U = 13.00, P < 0.01; altura: t = 8.67, g.l.= 18, P < 0.01). Por otro lado, el peso de la parte aérea y el tamaño de copa resultaron similares entre los tratamientos (parte aérea: t = 1.69, g.l.= 18, P = 0.1; copa: = 1.73, g.l. = 18, P = 0.10). Las plántulas de *Ebenopsis ebano* mostraron mayor biomasa en la parte aérea y la raíz principal (parte aérea: t = 4.27, g.l. = 18, P < 0.01; raíz: U = 11.00, P < 0.01), así como también mayor crecimiento de copa en ausencia de polvo (t = 5.84, g.l. = 18, P < 0.01). Sin embargo, hubo un crecimiento similar en altura de los grupos

estudiados ($t = 0.89$, g.l. = 18, $P = 0.38$). Solo para la especie *Neltuma laevigata* todas las fracciones de biomasa analizadas (parte aérea, biomasa total de raíz y subdivisiones) y de crecimiento (altura y copa) fueron mayores en ausencia de polvo, indicando un impacto negativo generalizado en su crecimiento (parte aérea: $t = 4.27$, g.l. = 18, $P < 0.01$; raíz: $U < 0.01$, $P < 0.01$; copa: $t = 8.29$, g.l. = 18, $P < 0.01$, altura: $t = 11.47$, g.l. = 18, $P < 0.01$).

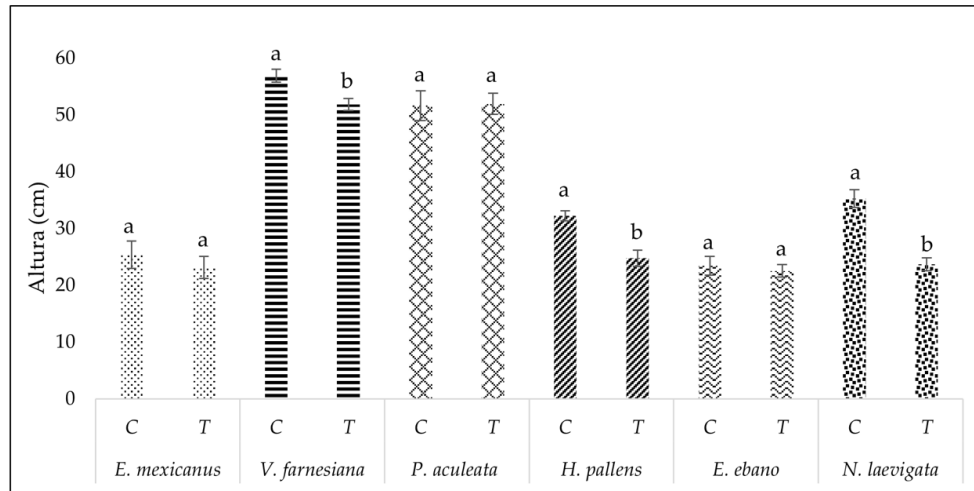


Figura 2. Promedios de altura por especie y tratamiento. T = tratamiento (con polvo), C = control (sin polvo). Las barras de error representan la desviación estándar. Letras iguales indican que no hay diferencia significativa entre tratamientos ($P \leq 0.05$).

DISCUSIÓN

Los resultados indican que la exposición a polvo de roca caliza incide en la biomasa total y la asignación de biomasa entre la parte aérea y el sistema radical, así como en la altura y el diámetro de copa de algunas especies estudiadas. Las respuestas fueron diferentes entre las especies. *N. laevigata* mostró una reducción generalizada en su desarrollo cuando fue expuesta al polvo, mientras que *H. pallens*, *E. ebano* y *P. aculeata* tuvieron respuestas diferenciadas en las variables medidas. En cualquier caso, la aplicación de polvo tuvo efectos negativos para las especies mencionadas. Estos resultados concuerdan con estudios previos que han reportado impactos adversos de este tipo de contaminante atmosférico en el crecimiento y fisiología de plantas jóvenes y adultas en diversos ambientes (Nanos y Ilias 2007, Van-Heerden *et al.* 2007, Sabir *et al.* 2023).

En la familia Fabaceae, diversas especies muestran sensibilidad a la deposición de partículas minerales. Por ejemplo, *Neltuma juliflora* (Iqbal 2014) y *Vachellia nilotica* (Tarannum *et al.* 2024) han sido reportadas como afectadas por la acumulación de caliza y otros tipos de polvo, lo que sugiere que la interferencia física sobre la superficie foliar puede alterar procesos fisiológicos clave. Los resultados obtenidos en este estudio para *N. laevigata* coinciden con tales observaciones, ya que esta especie mostró una respuesta más sensible que las demás a la deposición de partículas, a pesar de que estudios previos la clasificaron como una especie tolerante e incluso bioacumuladora de metales pesados como cobre y plomo (Duarte-Zaragoza *et al.* 2020). Esta aparente discrepancia podría atribuirse a las diferencias en la vía de exposición al contaminante. Mientras que Duarte-

Zaragoza *et al.* (2020) evaluaron la tolerancia de *N. laevigata* ante metales presentes en el suelo, donde las raíces desempeñan un papel activo en la exclusión, inmovilización o detoxificación de iones metálicos, en el presente experimento la exposición fue foliar, implicando un tipo de estrés distinto. La deposición superficial de partículas puede afectar la transpiración y el intercambio gaseoso de manera directa, mecanismos para los cuales esta especie no necesariamente presenta adaptaciones específicas. En este sentido, la respuesta observada refuerza la importancia de considerar la vía de exposición y el tipo de contaminante al evaluar la tolerancia fisiológica de las especies vegetales.

La única variable que presentó una respuesta positiva al polvo fue la cobertura de copa de *V. farnesiana*, aun cuando su altura se redujo. Un patrón similar, aunque de crecimiento generalizado, fue reportado en *Acacia modesta* expuesta a residuos de roca caliza (Hayyat *et al.* 2021). *V. farnesiana* es considerada una especie competitiva pero intolerante a la sombra (Suansa y Al-Mefarrej 2019). En este contexto, los resultados sugieren que, en respuesta a la limitación de luz provocada por el polvo, *V. farnesiana* podría estar priorizando el desarrollo lateral de la copa para maximizar la captación de luz, mientras limita su crecimiento en altura. Este tipo de modificaciones en la estructura de la copa son más comunes en plantas jóvenes, que deben aumentar su eficiencia en la captura de luz (Niinemets 2010). Así, una redistribución de recursos explicaría el desarrollo similar en biomasa seca, pero con diferencias en altura y cobertura, es decir, una mayor captación de luz con los mismos recursos empleados, lo que es consistente con lo observado. Mientras la anatomía y morfología foliar determinan la capacidad de retención de partículas (Sæbø *et al.* 2012), también pueden definir el umbral de tolerancia fisiológica ante este tipo de estrés. La sensibilidad diferencial observada entre especies podría explicarse por sus adaptaciones anatómicas foliares, desarrolladas para enfrentar el estrés hídrico característico de la región.

Especies como *N. laevigata*, *E. ebano* y *H. pallens* presentan una densidad estomática muy baja, lo cual, si bien contribuye a reducir la transpiración (González *et al.* 2016), también las hace más susceptibles a que la obstrucción de unos cuantos estomas disminuye el intercambio gaseoso. Por el contrario, las especies que mostraron una respuesta más tolerante (*E. mexicanus* y *V. farnesiana*) tienen una densidad estomática moderada. *E. mexicanus*, además, presenta estomas en la cara inferior de la hoja, donde no se acumula el polvo (González *et al.* 2016), lo que podría conferirle una mayor plasticidad para tolerar la deposición de partículas sin comprometer el intercambio gaseoso.

La reducción en la entrada de CO₂ afecta de manera directa la tasa fotosintética, lo que a su vez limita el crecimiento de tejidos (Hopkins y Hüner 2008). Por lo tanto, la disminución en la tasa fotosintética constituye una ruta fisiológica probable detrás de los patrones diferenciales de crecimiento observados. Por otro lado, es probable que la absorción radical de calcio haya tenido un papel secundario, dada la corta duración del experimento (90 días) que restringe los procesos de meteorización y solubilización en el suelo.

Existen estudios previos que han identificado especies con tolerancia a la deposición de partículas en la atmósfera en distintos ecosistemas (Fakhry y Migahid 2011, Siqueira-Silva *et al.* 2016, Zajec *et al.* 2016, Sabir *et al.* 2023). Incluso, otras leguminosas como *Vachellia caven*, *Neltuma nigra* y *Geoffroea decorticans*, que tienen una morfología similar a las estudiadas en este trabajo, son muy eficientes en la retención de material particulado en el follaje (Dalmasso *et al.* 1997). Si bien esta capacidad de

retención puede ser una ventaja en entornos urbanos para la mitigación de contaminación del aire, en ambientes naturales podría ser un factor clave en la reducción en el desarrollo observado en las plantas estudiadas. La identificación de especies nativas resistentes, como *E. mexicanus* o *V. farnesiana*, tiene una aplicación directa en la selección de especies para estrategias de restauración de áreas impactadas por la minería de caliza. Asimismo, es probable que las especies más tolerantes sean aptas para su establecimiento en áreas urbanas. No obstante, en estos entornos, el material particulado puede tener una composición diferente y ser más abundante, lo que requiere de un estudio específico para evaluar su impacto.

Por otro lado, la presencia prolongada al polvo puede contribuir a la mortalidad de especies sensibles a este tipo de contaminante, favoreciendo el establecimiento de aquellas más resistentes (Najafi Zilaie *et al.* 2023). En consecuencia, se han documentado cambios en la estructura de la vegetación causados por la disminución del desarrollo de especies dominantes en otros ecosistemas desde hace varias décadas (Farmer 1993). En ese sentido, los hallazgos presentados donde se observa una variabilidad en la sensibilidad de las especies destacan la necesidad de evaluar otros aspectos del desarrollo vegetal que influyen en la resiliencia de los ecosistemas. Por ejemplo, se ha encontrado una disminución del tamaño y viabilidad de las semillas producidas por plantas expuestas a material particulado (IbrahimPour *et al.* 2021), lo que a largo plazo puede modificar la dinámica de la regeneración natural. Si bien en la región estudiada hay información sobre los resultados de actividades de restauración posteriores a la minería (Marroquín-Castillo *et al.* 2017), no se encontraron estudios previos acerca del impacto del material particulado en la vegetación de las áreas cercanas a las actividades de extracción, donde no se aplican estrategias de restauración. Sin embargo, los resultados de este y otros estudios reflejan que las áreas circundantes a las minas también pueden tener impactos que requieran estrategias de rehabilitación. En consecuencia, se hace evidente revisar y evaluar de forma exhaustiva las estrategias de mitigación de polvo, así como implementar un monitoreo permanente de su dispersión y deposición en el entorno cercano a las minas.

El análisis de los efectos de la contaminación atmosférica en condiciones naturales en esta zona presenta la dificultad de aislar los efectos del contaminante de aquellos causados por el estrés climático. Esta investigación, realizada en condiciones controladas, permitió evaluar la respuesta de las plantas a la presencia de partículas de polvo sin la interferencia del estrés por sequía o temperaturas extremas. Futuros estudios podrían centrarse en analizar el desarrollo de estas especies en áreas cercanas a minas de caliza, considerando la interacción con factores ambientales característicos de la región. Además, es importante incluir aspectos técnicos de las características del polvo como la concentración, dinámica de deposición, tamaño de partícula y su superficie para establecer relaciones dosis-respuesta. Para determinar las posibles consecuencias ecológicas con mayor profundidad, se podría evaluar el impacto en la producción de semillas y la regeneración natural de las comunidades vegetales afectadas para identificar futuros cambios en la estructura vegetal. Esto permitirá diseñar estrategias de manejo más efectivas, tanto para la mitigación de impactos en los ecosistemas como para la selección de especies adecuadas en proyectos de restauración y reforestación.

CONCLUSIONES

Este estudio demuestra que la susceptibilidad a la contaminación por polvos de roca caliza varía entre especies de la familia Fabaceae. *Neltuma laevigata* fue la más susceptible a la contaminación ya que respondió de manera negativa en todos los parámetros estudiados, mientras que la más tolerante fue *E. mexicanus*, sin afectaciones en el crecimiento. Las plántulas de *P. aculeata* y *E. ebano* presentaron mayor biomasa aérea y radicular en el tratamiento control, mientras que *H. pallens* mostró más biomasa subterránea y altura también en el control. *Vachellia farnesiana* fue la única especie con un aumento en la copa y una reducción en la altura bajo la exposición al material particulado. Estos resultados aportan evidencia sobre los efectos diferenciales del polvo de caliza en el crecimiento de especies nativas, lo que puede ser relevante como información base para la restauración ecológica y el manejo de ecosistemas afectados por partículas sedimentarias.

AGRADECIMIENTOS

A la memoria de Dr. Enrique Jurado, quien contribuyó significativamente a la concepción de este trabajo. Su pasión por la ecología vegetal y la labor científica continúa guiando nuestro trabajo.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

LITERATURA CITADA

- Alvarado MIA (2023) La lucha contra la contaminación atmosférica: el caso de las pedreras en los cerros Las Mitras y el Topo Chico, 1970-2015. Bloch. Revista Estudiantil de Historia 1(6): 127-147.
- Dalmaso A, Candia R, Llera J (1997) La vegetación como indicadora de la contaminación por polvo atmosférico. Multequina 6: 85-91.
- Duarte-Zaragoza VM, Pérez-Hernández VS, Hernández-Acosta E, Villanueva-Morales A (2020) Estudio exploratorio de la acumulación de plomo y cobre en *Prosopis laevigata* en depósitos mineros. Ecosistemas y recursos agropecuarios 7(2). <https://doi.org/10.19136/era.a7n2.2311>
- Estrada CE, Arévalo JR, Villareal QJÁ, Salinas RMM, Encina-Domínguez JA, Gonzalez RH, Cantú ACM (2015) Classification and ordination of main plant communities along an altitudinal gradient in the arid and temperate climates of northeastern Mexico. The Science of Nature 102(59): 1-11. <https://doi.org/10.1007/s00114-015-1306-3>
- Estrada-Castillón E, Villarreal-Quintanilla JÁ, Mora-Olivo A, Cuéllar-Rodríguez G, Sánchez-Salas J, Gutiérrez-Santillán TV, Valdes-Alameda R, González-Cuéllar D, González-Montelongo JRA (2023) Ethnobotany of the useful native species in Linares, Nuevo León, México. Sustainability 15(15): 11565. <https://doi.org/10.3390/su151511565>

- Fakhry AM, Migahid MM (2011) Effect of cement-kiln dust pollution on the vegetation in the western Mediterranean desert of Egypt. *International Journal of Environmental and Ecological Engineering* 5(9): 480 - 486. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1056026>
- Farmer AM (1993) The effects of dust on vegetation—a review. *Environmental pollution* 79(1): 63-75. [https://doi.org/10.1016/0269-7491\(93\)90179-R](https://doi.org/10.1016/0269-7491(93)90179-R)
- Flores J, Jurado E (1998) Germination and early growth traits of 14 plant species native to northern Mexico. *Southwestern Naturalist* 43: 40-46.
- Ganapathi H, Phukan M (2020) Environmental hazards of limestone mining and adaptive practices for environment management plan. In: Singh R, Shukla P, Singh P (eds) *Environmental processes and management*. Springer. Switzerland. pp 121–134. https://doi.org/10.1007/978-3-030-38152-3_8
- García E (1964) Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la Rep. Mexicana). Universidad Nacional Autónoma de México, Inst. Geografía. México, DF. 246pp.
- Gieré R, Querol X (2010) Solid particulate matter in the atmosphere. *Elements* 6(4): 215-222. <https://doi.org/10.2113/gselements.6.4.215>
- González RH, Maiti R, Kumari A (2016) Research advances on leaf and wood anatomy of woody species of a Tamaulipan thorn scrub forest and its significance in taxonomy and drought resistance. *Forest Research* 5(3): 183-191. <https://doi.org/10.4172/2168-9776.1000183>
- González-Rodríguez H, Himmelsbach W, Sarquís-Ramírez JI, Cantú-Silva I, Ramírez-Lozano RG, López-Hernández JM (2016) Seasonal water relations in four co-existing native shrub species from Northeastern Mexico. *Arid Land Research and Management* 30(4): 375-388. <https://doi.org/10.1080/15324982.2015.1133726>
- Grantz DA, Garner JHB, Johnson DW (2003) Ecological effects of particulate matter. *Environment International* 29(2-3): 213-239. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(02\)00181-2](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(02)00181-2)
- Hayyat MU, Siddiq Z, Mahmood R, Khan AU, Cao KF (2021) Limestone quarry waste promotes the growth of two native woody angiosperms. *Frontiers in Ecology and Evolution* 9: 637833. <https://doi.org/10.3389/fevo.2021.637833>
- Hirano T, Kiyota M, Aiga I (1995) Physical effects of dust on leaf physiology of cucumber and kidney bean plants. *Environmental Pollution* 89(3): 255-261. [https://doi.org/10.1016/0269-7491\(94\)00075-O](https://doi.org/10.1016/0269-7491(94)00075-O)
- Hopkins WG, Hüner NP (2008) *Introduction to plant physiology*. 4th ed. John Wiley & Sons.
- IbrahimPour S, KhavaninZadeh AR, Taghizadeh-Mehrjardi R, De Boeck HJ, Gul A (2021) Dust-related impacts of mining operations on rangeland vegetation and soil: A case study in Yazd Province, Iran. *Environmental Earth Sciences* 80(467). <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09758-5>
- Iqbal MZ, Shafiq M, Athar M (2014) Adaptation in *Atriplex griffithii* and *Prosopis juliflora* plants in response to cement dust pollution. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management* 18(3): 389-395. <http://dx.doi.org/10.4314/jasem.v18i3.4>
- Kumar GS, Reddy AN (2016) Application of remote sensing to assess environmental impact of limestone mining in the Ariyalur district of Tamilnadu, India. *Journal of Geomatics* 10(2): 158-163.
- Kusza G, Gołuchowska B, Szewczyk M (2016) Changes in physicochemical properties of soils in the area affected by lime industry. *Ecological Chemistry and Engineering A* 23(4): 433-442.
- Li H, Zhu X, Kong W, Zheng M, Guo X, Wang T (2023) Physiological response of urban greening shrubs to atmospheric particulate matter pollution: An integral view of ecosystem service and plant function. *Environmental and Experimental Botany* 213: 105439. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2023.105439>
- Marroquín-Castillo JJ, Alanís-Rodríguez E, Jiménez-Pérez J, Aguirre-Calderón OA, Mata-Balderas JM, Rubio-Camacho EA, Collantes Chávez-Costa A (2017) Efecto de la restauración post-minería de la

- comunidad vegetal de matorral xerófilo, en Nuevo León, México. *Acta Botánica Mexicana* 120: 7-20. <https://doi.org/10.21829/abm120.2017.1262>
- Najafi-Zilaie M, Mosleh-Arani A, Etesami H (2023) Evaluation of air pollution (dust) tolerance index of three desert species *Seidlitzia rosmarinus*, *Haloxylon aphyllum* y *Nitraria schoberi* under salinity stress. *Environmental Monitoring and Assessment* 195(7): 838 <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11436-x>
- Nanos GD, Ilias IF (2007) Effects of inert dust on olive (*Olea europaea* L.) leaf physiological parameters. *Environmental Science and Pollution Research* 14: 212-214. <https://doi.org/10.1065/espr2006.08.327>
- Niinemets Ü (2010) A review of light interception in plant stands from leaf to canopy in different plant functional types and in species with varying shade tolerance. *Ecological Research* 25: 693-714. <https://doi.org/10.1007/s11284-010-0712-4>
- Padgett PE, Dobrowolski WM, Arbaugh MJ, Eliason SA (2007) Patterns of carbonate dust deposition: implications for four federally endangered plant species. *Madroño* 54(4): 275-285. [https://doi.org/10.3120/0024-9637\(2007\)54\[275:POCDDI\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.3120/0024-9637(2007)54[275:POCDDI]2.0.CO;2)
- Paling EI, Humphries G, McCardle I, Thomson G (2001) The effects of iron ore dust on mangroves in Western Australia: Lack of evidence for stomatal damage. *Wetlands Ecology and Management* 9: 363-370. <https://doi.org/10.1023/A:1012008705347>
- Ram SS, Majumder S, Chaudhuri P, Chanda S, Santra SC, Chakraborty A, Sudarshan M (2015) A review on air pollution monitoring and management using plants with special reference to foliar dust adsorption and physiological stress responses. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 45(23): 2489-2522. <https://doi.org/10.1080/10643389.2015.1046775>
- Romo RJR, Cruz MJ (2009) Carta geológico-minera y geoquímica Matehuala, clave F14-A25, escala 1:50 000, estado de San Luis Potosí y Nuevo León. Servicio Geológico Mexicano (SGM). https://www.sgm.gob.mx/publicaciones_sgm/Informe_b.jsp?wparam=1&clav=242009RORJ0001. Fecha de consulta: 9 de noviembre de 2025.
- Sabir MA, Guo W, Nawaz MF, Yasin G, Yousaf MTB, Gul S, Hussain T, Rahman SU (2023) Assessing the effects of limestone dust and lead pollution on the ecophysiology of some selected urban tree species. *Frontiers in Plant Science* 14: 1144145. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.114414>
- Sæbø A, Popek R, Nawrot B, Hanslin HM, Gawronska H, Gawronski SW (2012) Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces. *Science of the Total Environment* 427-428: 347-354. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.03.084>
- Siqueira-Silva AI, Pereira EG, Modolo LV, Paiva EAS (2016) Leaf structural traits of tropical woody species resistant to cement dust. *Environmental Science and Pollution Research* 23: 16104-16114. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6793-z>
- Suansa NI, Al-Mefarrej HA (2019) Ameliorative effect of shade on seedling growth—Evidence from field experiment of *Vachellia farnesiana* (L.) Willd. *American Journal of Plant Sciences* 10(1): 12. <https://doi.org/10.4236/ajps.2019.101002>
- Tarannum N, Rathore N, Natwadiya A, Kumar S, Chaudhary N (2024) Evaluation of the effects of dust pollution on specific plant species near and around the marble mining site in Rajasthan, India. *Environmental Science and Pollution Research* 31(23): 33515-33529. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33449-w>
- Valdes-Alameda R, Jurado E, Flores J, Estrada E (2024) Positive relationship between seedlings and saplings with adult trees at small scale influenced by dispersal vectors in semiarid thornscrub. *Acta Botanica Brasílica* 38: e20230130. <https://doi.org/10.1590/1677-941X-ABB-2023-0130>
- Van-Heerden PDR, Krüger GHJ, Louw MK (2007) Dynamic responses of photosystem II in the Namib Desert shrub, *Zygophyllum prismatocarpum*, during and after foliar deposition of limestone dust. *Environmental Pollution* 146(1): 34-45. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.06.027>

- Vardaka E, Cook CM, Lanaras T, Sgardelis SP, Pantis JD (1995) Effect of dust from a limestone quarry on the photosynthesis of *Quercus coccifera*, and evergreen sclerophyllous shrub. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 54: 414-419.
- Yaghmaei L, Jafari R, Soltani S, Eshghizadeh HR, Jahanbazy H (2022) Interaction effects of dust and water deficit stresses on growth and physiology of Persian oak (*Quercus brantii* Lindl.). *Journal of Sustainable Forestry* 41(2): 134-158. <https://doi.org/10.1080/10549811.2020.1845742>
- Zajec L, Gradinjan D, Klančnik K, Gaberščik A (2016) Limestone dust alters the optical properties and traits of *Fagus sylvatica* leaves. *Trees* 30: 2143-2152. <https://doi.org/10.1007/s00468-016-1441-2>
- Zia-Khan S, Spreer W, Pengnian Y, Zhao X, Othmanli H, He X, Müller J (2014) Effect of dust deposition on stomatal conductance and leaf temperature of cotton in northwest China. *Water* 7(1): 116-131. <https://doi.org/10.3390/w7010116>